

ПРИВНОСИМАЯ ДЕФЕКТНОСТЬ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ НАНОСТРУКТУР В ВАКУУМЕ

MICRO-CONTAMINATION OF NANOSTRUCTURES DURING ITS MANUFACTURING IN VACUUM

Ю.В.Панфилов / panfilov@bmstu.ru, Л.Л.Колесник

Y.V.Panfilov, L.L.Kolesnik

МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва

Проанализированы основные источники привносимой дефектности изделий микро и наноэлектроники в вакуумном технологическом оборудовании кластерного типа. Рассмотрены механизмы формирования потоков мелкодисперсных частиц в илловых и технологических вакуумных камерах, молекулярных загрязнений и следов металлов в результате изнашивания конструкционных материалов и трибодесорбции.

Main sources of micro-contamination in micro and nano-electronics devices in vacuum cluster tool systems were analyzed. Generation mechanism of microparticles flow at load lock and processing vacuum chambers, molecules contamination and metal particles as a results of construction materials wear and tribo-desorption were shown.

Ключевые слова: привносимая дефектность, вакуумное оборудование, микро и наноэлектроника, молекулярные загрязнения, трибодесорбция.

Key words: micro-contamination, vacuum equipment, micro and nanoelectronics, molecules contamination, tribo-desorption.

Утверждение, что в борьбе с привносимой дефектностью изделий микроэлектроники победить невозможно [1] наглядно проявляется при переходе к производству изделий наноэлектроники. Так, при минимальных размерах элементов современных сверхбольших интегральных микросхем (СБИС) 7 – 18 нм критичными с точки зрения выхода годных СБИС становятся не только мелкодисперсные частицы (МДЧ) [2], а и, так называемые, молекулярные загрязнения [3]. Целью данной статьи является анализ источников привносимой дефектности изделий микро и наноэлектроники в вакуумном технологическом оборудовании кластерного типа.

Кластерные производственные системы (рис. 1) объединяют в едином вакуумном цикле различные технологические операции и на сегодняшний день на них производятся самые современные изделия микро и наноэлектроники. Одна из основных проблем проектирования и эксплуатации такого оборудования связана с обеспечением качества вакуумной технологической среды, а именно, с минимумом привносимой дефектности изготавливаемых микро и наноструктур. Если для микроструктур с размерами порядка 1 мкм основными причинами брака из-за привносимой дефектности являются твердые или жидкие мелкодисперсные частицы [2], то для наноструктур с размерами в десятки и даже единицы нанометров критичными с точки зрения выхода годных становятся молекулярные загрязнения [3] в виде продуктов распада полимерных конструкционных материалов и органических соединений, а также продуктов газовой выделений резиновых смесей. Кроме того, в результате высокотемпературного и фрикционного воздействия (трибодесорбции [4]) на материалы внутрикамерных устройств и механизмов на обрабатываемые наноструктуры попадают атомы и молекулы кислорода, метана, моно и диоксида углерода, соединений серы, а также, металлов и их оксидов. В оборудовании кластерного типа

присутствует еще одна причина появления брака, связанная с проникновением газообразных реагентов и продуктов плазмохимических реакций из одного технологического модуля через высоковакуумный транспортный модуль в другие технологические модули.

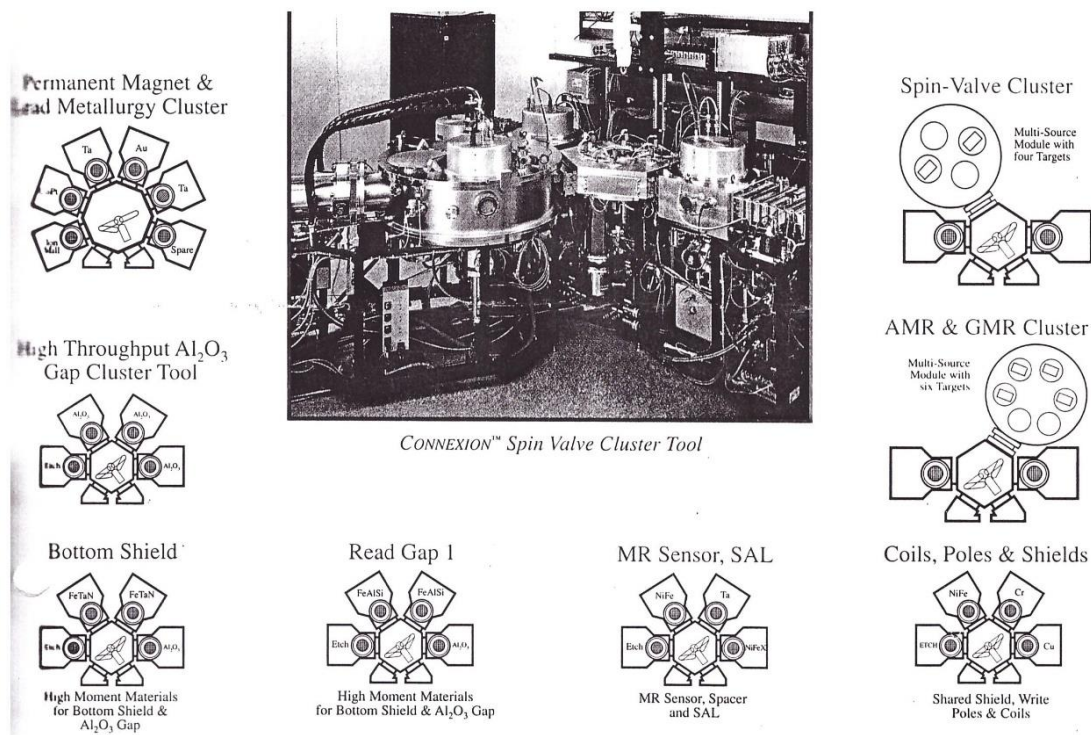


Рис. 1. Кластерные производственные системы [5]

Привносимая дефектность изделий микроэлектроники в виде мелкодисперсных частиц была достаточно подробно исследована в 90-е годы прошлого столетия, что нашло отражение во множестве публикаций, в том числе в [5]. Были проведены исследования распределения МДЧ на поверхности полупроводниковой пластины после откачки вакуумных, в том числе шлюзовых камер, напуска в них воздуха для разгерметизации, а также после перемещения пластины в вакуумных технологических камерах с помощью, например, транспортеров. На рис. 2 приведены результаты измерения набора дозы привносимой дефектности на поверхности полупроводниковой пластины в установке шлюзового типа 01НИ-7-015 разработки НИИТМ г. Зеленоград.

Молекулярные загрязнения полупроводниковых пластин с формируемыми наноструктурами в вакуумных камерах технологического оборудования могут появляться, во-первых, при их разгерметизации из атмосферы ЧПП и состоять из органофосфатов, силиконов, крезолов, углеводов и других соединений [3], во-вторых, в результате газовой выделения из органических материалов и пар трения, десорбции паров воды со стенок вакуумной камеры, газонатекания через подвижные и неподвижные контакты, в третьих, продукты коррозии (порядка $100 \text{ \AA}/30$ дней) и окисления поверхности технологической оснастки и стенок вакуумной камеры. Интенсивность образования молекулярных загрязнений, например, фосфором может составлять $2,5 \cdot 10^{11}$ атомов/см² в час [3].

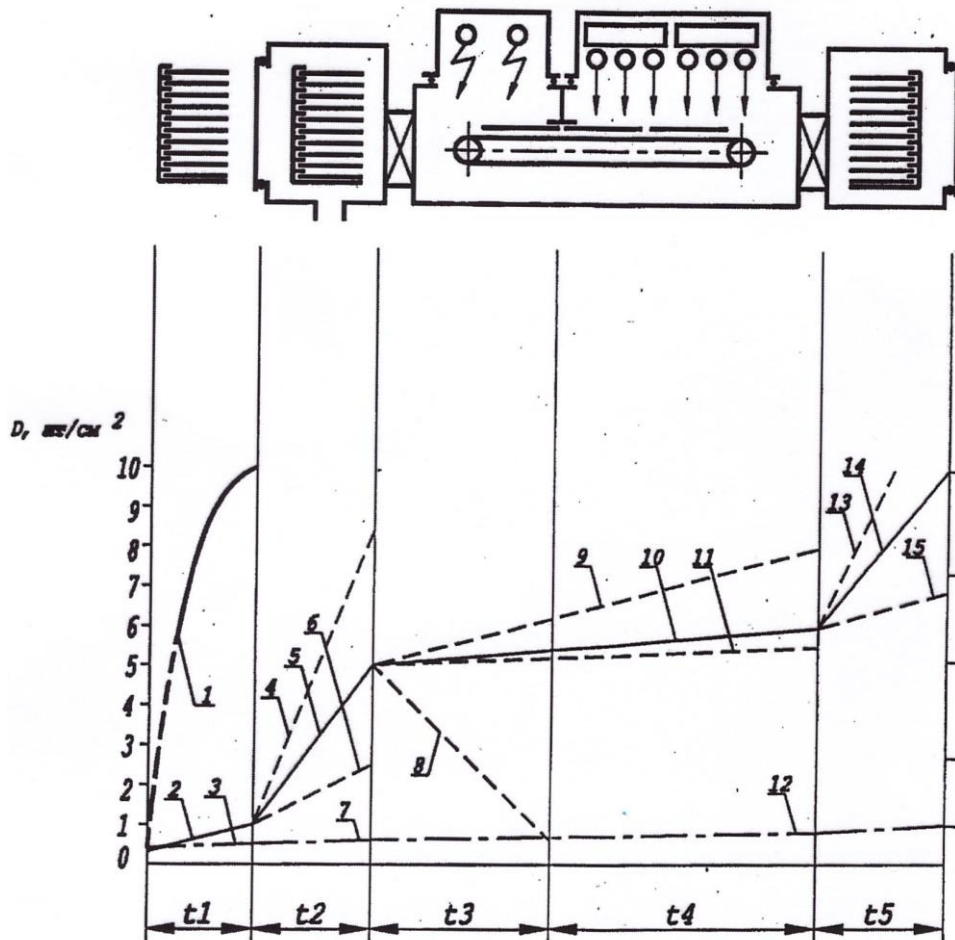


Рис. 2. Схема набора дозы D привносимой дефектности изделий, обрабатываемых на установке 01НИ-7-015: 1 – в чистом производственном помещении (ЧПП) класса 100 (по Федеральному стандарту США FS-209c); 2 – в ЧПП класса 10; 3 – в ЧПП класса 1; 4 – в шлюзовом загрузочном устройстве (ШЗУ) после откачки при доле осаждаемых МДЧ, равной 0,2; 5 – при доле, равной 0,17; 6 – при доле, равной 0,1; 7 – при доле, равной 0 (при использовании вакуумного СМФ-контейнера); 8 – при удалении МДЧ с поверхности пластины; 9 – в рабочей вакуумной камере при потоке МДЧ, равном $1 \cdot 10^{-1}$ шт./($\text{см}^2 \cdot \text{с}$); 10 – при потоке МДЧ, равном $5 \cdot 10^{-2}$ шт./($\text{см}^2 \cdot \text{с}$); 11 – при потоке МДЧ, равном $1 \cdot 10^{-2}$ шт./($\text{см}^2 \cdot \text{с}$); 12 – при потоке МДЧ, равном $1 \cdot 10^{-2}$ шт./($\text{см}^2 \cdot \text{с}$); 13 – в ШЗУ выгрузки после напуска воздуха при доле осаждаемых МДЧ, равной 0,2; 14 – при доле осаждаемых МДЧ, равной 0,17; 15 – при доле осаждаемых МДЧ, равной 0,1;

В соответствии со стандартом SEMI F21–951 к молекулярным загрязнениям в вакууме можно отнести конденсируемые соединения (МС) и следы металлов (ММ). ГОСТ Р ИСО 14644-9-2013 характеризует классы чистоты поверхности по концентрации частиц, которые определяют максимально допустимую концентрацию частиц определенных размеров на поверхности полупроводниковой пластины. Измерение массовой концентрации поверхностных загрязнений основано на определении характерных длин волн основных функциональных групп загрязняющих веществ и мощности сигналов. С помощью современных методов можно проводить мониторинг загрязнений на уровне $0,1 \text{ нг}/\text{см}^2$ [3].

Следы металлов на поверхности полупроводниковых пластин в вакууме теоретически могут появиться в результате сублимации атомов металлической арматуры. Сублимация – многостадийный процесс, для проведения которого необходима дополнительная тепловая энергия. При ее подводе частицы материала твердого тела мигрируют на поверхности твердой фазы из состояния с наибольшей прочностью связей в состояние с их меньшей прочностью, а затем в газовую фазу. Одновременно из нее происходит десублимация частиц. Максимальную скорость процессов сублимации и десублимации в вакууме можно рассчитать по уравнению Герца-Кнудсена:

$$\frac{dN_u}{dt \cdot A} = \frac{p_{нас} \alpha_u}{\sqrt{2\pi m k T_u}} \frac{атом}{м^2 \cdot с},$$

где N_u - количество испаренных (сублимированных) атомов или молекул; t - время, с; A - площадь испарения (сублимации), м²; α_u - коэффициент испарения (для чистых материалов $\alpha_u=1$); m - масса испаренного (сублимированного) атома или молекулы, кг; T_u - температура испарения, К.

Давление насыщенного пара над поверхностью твердого тела, описывается уравнением Клапейрона-Клаузиуса:

$$\frac{dp_{нас}}{dT} = \frac{H_z - H_{ж}}{T(V_z - V_{ж})} = \frac{\Delta H}{TV_z},$$

где $p_{нас}$ – давление насыщенного пара испаряемого материала, Па; T - температура материала, К; H - энтальпия газа (z) и жидкости ($ж$), ккал/кмоль; V - объем газа (z) и жидкости ($ж$), м³ ($V_z \gg V_{ж}$); ΔH - теплота испарения, ккал/кмоль.

Однако, давление насыщенного пара при температуре ниже температуры испарения очень мало. Так, давление насыщенного пара металла, например, нептуния, при комнатной температуре в вакууме равно [6]:

$$\lg p_{нас} = 5,1 - 2,06 \cdot 10^4 / T,$$

где T – абсолютная температура, К.

При $T=1000$ К давление насыщенного пара составляет $p_{нас}=10^{-15}$ Па, а при комнатной температуре 293 К давление насыщенного пара составляет всего $p_{нас}=10^{-65}$ Па. При таких величинах давлений скорость процессов сублимации приблизительно составляет, соответственно, 10^7 и 10^{-39} атом/(м²с). Из этого следует, что при комнатной температуре загрязнения микро и наноструктур атомами и молекулами конструкционными материалами вакуумного технологического оборудования можно не учитывать.

Привносимая дефектность в виде атомов и молекул конструкционных материалов может иметь заметное влияние на характеристики наноструктур, вплоть до брака, в результате трибодесорбции [4] из пар трения внутрикамерных механизмов.

Как показал опыт проектирования и эксплуатации вакуумных транспортных и грузозачных модулей, основными источниками загрязнений в виде химически активных газов и мелкодисперсных частиц являются пары трения механизмов, направляющих, вводов движения, расположенных в высоком и сверхвысоком вакууме [7]. Накоплена информация по трибодесорбции в вакууме из различных сталей, полимерных материалов, минералов, твердосмазочных материалов, мягких металлов (серебро, свинец), причем трибодесорбция имеет как термический, так и атермический (при малых нагрузках и скоростях трения) характер. При трении синтетических каучуков выделяются композиции полипропиленового, этиленпропиленового, хлорбутилового и фторкаучуков. В спектре масс обнаружены низкомолекулярные соединения: метан, моно и диоксид углерода, неполимеризованные мономеры и летучие компоненты примесей.

Явления трибоэмиссии включают в себя различные физические и химические процессы, происходящие внутри и вокруг зоны контакта трущихся тел и приводящие к эмиссии атомов и молекул самих тел, окклюдированных газов и наночастиц [5]. Эти

свойства трибоэмиссионных явлений были положены в основу целого ряда разработок принципиально новых технологических процессов, материалов и методов с заданными свойствами, в том числе

- специальные трибологические покрытия, обладающие способностью к самовосстановлению и адаптирующихся к условиям эксплуатации,
- новые смазочные материалы для оборудования вакуумных и космических систем и особо чистой среды,
- новый метод анализа содержания и распределения газов в материалах и покрытиях.

Для использования в СВВ оборудовании НИТИ г. Рязань в 80-е годы прошлого столетия были разработаны два типа твердосмазочных покрытий на основе дисульфида молибдена: химико-термическое покрытие «Димолит-4» разработки ВНИИОФИ и ионно-плазменное покрытие «ИПН MoS_2 » разработки ИМАШ РАН. Однако, в спектре газовой выделений из пары трения с «Димолит-4» присутствовали следы серы и ее соединений, что оказалось не приемлемо для процессов молекулярно-лучевой эпитаксии, т.к. приводило к перелегированию гетероструктур на основе GaAs. Поэтому, в эксплуатацию были приняты узлы трения манипуляторов и направляющих скольжения с покрытием «ИПН MoS_2 », в спектре газовой выделений которых даже при температуре 773 К следов серы и ее соединений обнаружено не было (рис. 3).

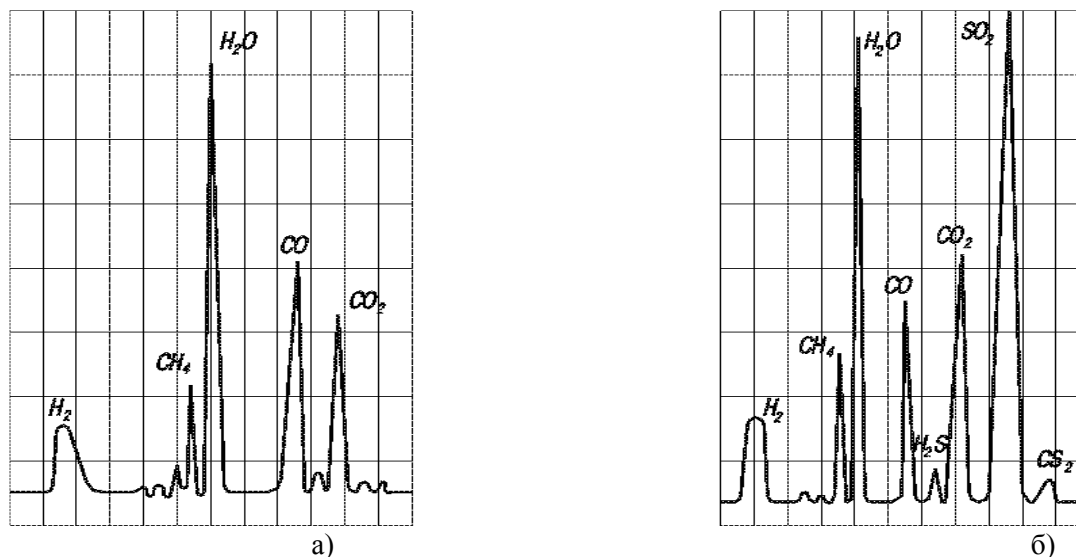


Рис. 3. Спектры газовой выделений покрытий на основе MoS_2 : а) ИПН MoS_2 , $T=773$ К, $t=1$ час; б) Димолит-4, $T=623$ К, $t=1$ час.

При исследовании привносимой дефектности от узлов и механизмов в вакуумных камерах технологического оборудования, с частости, от подшипников скольжения с ТСП на основе дисульфида молибдена, нанесенным вакуумным ионно-плазменным методом, были обнаружены следы металлов и серы на поверхности контрольных пластин, которые были размещены в непосредственной близости от подшипника скольжения (рис. 4). Причем, количество и состав этих следов изменялось с наработкой, выраженной в суммарном количестве оборотов вала подшипника.

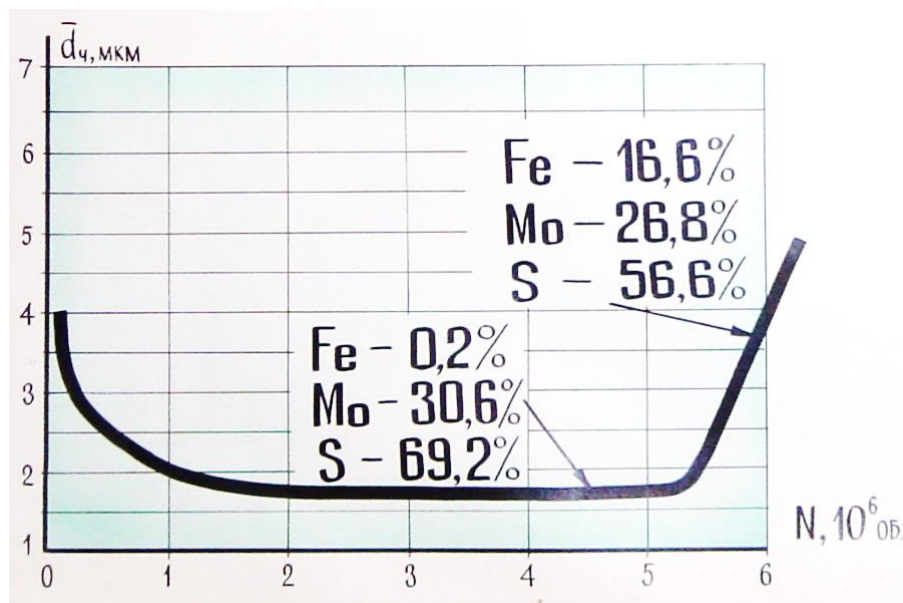


Рис. 4. Средний диаметр МДЧ и их химический состав в зависимости от наработки N подшипника скольжения с ТСП на основе MoS_2 .

Таким образом, анализ причин и источников привносимой дефектности изделий микро и нанoeлектроники, а также появления и распространения молекулярных загрязнений в вакуумном технологическом оборудовании кластерного типа показывает, что:

1. Для микроструктур с размерами порядка 1 мкм основными причинами брака из-за привносимой дефектности являются мелкодисперсные частицы, попадающие в вакуумные камеры с потоками технологического газа, отрывающиеся от стенок и оснастки частицы наносимых и стравливаемых пленок и слоев, в также частицы, генерируемые механизмами, работающими в вакууме;

2. Для наноструктур с размерами менее 100 нм (вплоть до 5 – 10 нм) критическими становятся молекулярные загрязнения в виде продуктов распада полимерных конструкционных материалов и органических соединений, продуктов газовой выделений резиновых смесей и т.п.;

3. Атомы и молекулы химически активных газов, таких например, как кислород, метан, моно и диоксид углерода, а также соединения серы, следы металлов и оксидов, отрицательно влияющих на характеристики формируемых наноструктур, появляются на полупроводниковых пластинах в результате высокотемпературного и фрикционного воздействия (трибодесорбции) на материалы внутрикамерных устройств и механизмов. а также их износа;

4. Причиной появления брака обрабатываемых в оборудовании кластерного типа наноструктур является атомы и молекулы газообразных реагентов и продуктов плазмохимических реакций, диффундирующих из одних технологических модулей в другие через транспортно-загрузочные и промежуточные модули.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чистые помещения. Под ред. И. Хаякавы /Пер. с японск. М.: Мир, 1990, 456 с.
2. Панфилов Ю.В. Проектирование вакуумного технологического оборудования для производства СБИС по критерию минимума привносимой дефектности // Электронная техника. Сер.3. Микроэлектроника. Вып. 1 (135), 1990, С. 51 – 59.

3. Севрюкова Е.А. Теория ростового процесса молекулярных загрязнений и научные основы контроля чистоты поверхностей изделий индустрии высоких технологий / Автореферат дисс. д.т.н., М., МИЭТ (ТУ), 2016. – 40 с.

4. Невшупа Р.А. Научные основы управления процессами трибодесорбции газов в узлах трения механизмов сверхвысоковакуумного оборудования электронной техники и нанотехнологий / Автореферат дисс. д.т.н., М., МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 32с.

5. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. Совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Технология, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. Т. III-8 / Ю.В. Панфилов, Л.К. Ковалев, В.Г. Блохин и др.; Под общ. ред. Ю.В. Панфилова. 2000. 744 с.

6. Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

7. E.A. Deulin, V. P. Mikhailov, Y.V. Panfilov, R.A. Nevshupa Mechanics and physics of precise vacuum mechanisms / Springer, 2010, 234 pp